引用格式:孙越冬, 窦正道, 赵进, 等. 滇黔桂盆地桂中坳陷凤页1井钻完井关键技术[J]. 油气藏评价与开发, XXXX, XX(XX):
Sun Yuedong, Dou Zhengdao, Zhao Jin, et al. Key drilling and completion technologies for the fengye-1 well in the Guizhong Depression, Dian-Qian-Gui Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, XXXX, XX(XX):
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025434

滇黔桂盆地桂中坳陷凤页1井钻完井关键技术

孙越冬[1], 窦正道[1], 赵 进[1], 胡忠涛[2], 李祺隆[1], 陈小元[2]
(1.中国石化江苏油田分公司石油工程技术研究院,江苏 扬州 225000;2.中国石化华东石油工程有限公司江苏钻井公司,江苏 扬州 225000)

摘要:凤页1井是江苏油田部署于环江—柳州喀斯特地貌溶洞发育带的首口页岩气风险探井,旨在获取凤山向斜鹿寨组页岩参数、评价区域页岩气勘探潜力。该井钻遇地层均为中古生界,面临邻井资料少、地表—地下构造复杂、钻井施工难度大等挑战,具体包括浅层恶性漏失、地层可钻性差、井壁失稳垮塌、长井段系统取心及超长封固段固井等难题。为实现安全高效钻探,本研究集成应用了系列针对性技术措施:钻前采用高密度电法与平台广域电磁法探测井周1 000 m以浅的溶洞与破碎带,优化井位部署,从源头规避浅层严重漏失;基于建立的地层可钻性剖面及实钻钻头适应性分析,优选抗研磨、抗冲击高效钻头与取心工具,显著提升各开次机械钻速;针对马平组失返性漏失,采用清水强钻充分揭露漏层后,实施高注高挤堵漏工艺,有效解决恶性漏失难题;针对黄金组硬脆性砂泥岩垮塌,应用多级粒径配合微纳米封堵材料的钻井液体系,并结合专项通井与稠浆扫井措施,及时恢复井壁稳定;面对取心层位岩性硬、裂缝发育、裸眼段长等难点,通过优化取心钻具组合与钻进参数,完成进尺220.08 m,平均取心收获率达97.36%;针对长封固段固井易漏、局部井眼呈“糖葫芦”形态等问题,依托井径分析与漏失层识别,优化施工参数,采用“正注反挤”工艺与弹韧性防气窜水泥浆体系,成功完成5 540 m井段封固,固井质量优质。本井通过综合应用上述关键技术,顺利完钻,并在鹿寨组二段获得良好油气显示,为该区页岩气后续勘探开发提供了重要技术借鉴与实践范本。

关键词:滇黔桂盆地;桂中坳陷;中古生界;喀斯特地貌;页岩气;井漏;高效钻头;连续取心
中图分类号:TE242 **文献标识码**:A

Key drilling and completion technologies for the fengye-1 well in the Guizhong Depression, Dian-Qian-Gui Basin

Sun Yuedong[1], Dou Zhengdao[1], Zhao Jin[1], Hu Zhongtao[2], Li Qilong[1], Chen Xiaoyuan[2]

(1. Petroleum Engineering Technology Research Institute, Jiangsu Oilfield Branch, Sinopec, Yangzhou , Jiangsu 225000, China; 2. Jiangsu Drilling Company, Sinopec East China Petroleum Engineering Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225000, China)

Abstract: Well Fengye 1 is the first shale gas risk exploration well deployed by Jiangsu Oilfield in the Huangui-Liuzhou karst cave development zone, aiming to obtain shale parameters of the Lugaizai Formation in the Fengshan Syncline and evaluate the regional shale gas exploration potential. The well penetrated exclusively Middle-Upper Paleozoic strata and faced multiple challenges including scarce data from adjacent wells, complex surface-subsurface structures, and significant drilling difficulties, specifically severe shallow lost circulation, poor formation drillability, wellbore instability and collapse, long-interval systematic coring, and ultra-long cementing sections. To achieve safe and efficient drilling, this study implemented a series of targeted technical measures: Pre-drilling detection using high-density electrical and wide-field electromagnetic methods to identify caves or fractured zones within 1 000 m depth around the well location, optimizing well placement and avoiding severe shallow lost circulation at the source. Based on established formation drillability profiles and real-time bit adaptability analysis, wear- and impact-resistant high-efficiency drill bits and coring tools were selected, significantly improving the rate of penetration (ROP) in each drilling phase. For lost circulation in the Maping Formation, after fully exposing the loss zone by drilling with water, a high-injection high-squeeze plugging technique was successfully applied to address severe loss. For collapse of hard-brittle sandstone and mudstone in the Huangjin Formation, a drilling fluid system with multi-grade particle size distribution and nano-micro sealing materials, combined with engineering measures such as dedicated reaming and viscous slurry sweeping, was used to promptly restore wellbore stability. To overcome coring difficulties such as hard and fractured lithology, high-angle fractures, and long open-hole

收稿日期:2026-01-16。
第一作者简介:孙越冬(1997—),男,硕士,助理研究员,从事常规、非常规油气钻井工作。地址:江苏省扬州市邗江区文汇西路1号,邮政编码:225000。 E-mail:sunyd.jsyt@sinopec.com
基金项目:中国石化科技项目(P26012_1)。

sections, coring bits and barrels were optimized along with coring parameters, resulting in 220.08 m of core recovered with an average recovery rate of 97.36%. To mitigate cementing risks in the long interval, including potential fluid loss and "hourglass" wellbore geometry, cementing parameters were optimized based on caliper log analysis and loss zone identification. A combination of forward injection-reverse squeeze cementing technology and an elastic-flexible gas migration-resistant cement slurry system was employed, successfully cementing the 5 540 m section with excellent quality. Through the integrated application of these key technologies, Well Fengye 1 was completed efficiently and safely, with promising hydrocarbon shows encountered in the second member of the Lugaizai Formation. This well provides important technical reference and a practical model for subsequent shale gas exploration and development in this region.

Keywords: Dian-Qian-Gui Basin; Guizhong Depression; Mid-Palaeozoic Erathem; karst landform; shale gas; well leakage; efficient drill bit; continuous coring

凤页1井位于滇黔桂盆地桂中坳陷宜山凹陷凤山向斜，是落实凤山向斜鹿寨组页岩气潜力的首口直井风险探井。该井所处区域的典型喀斯特地貌易引发浅层漏失，古生界多套地层发育的硅质条带导致机械钻速低，且地层压力系统不明导致井壁失稳隐患突出。当前针对喀斯特地貌浅层漏失预测、硅质条带地层高效钻井、复杂压力系统下井壁稳定等关键技术，尚未形成成熟解决方案[1-3]，成为制约该地区页岩气勘探开发的核心瓶颈。

因此，本文以凤页1井钻探实践为研究载体，系统剖析喀斯特地貌区页岩气探井的地质特征与施工难点，重点研究电法探测优化、高效钻头适配、创新堵漏工艺等技术的应用机制，旨在明确复杂构造带风险探井的关键技术参数与实施路径，为滇黔桂盆地同类井的勘探部署提供地质依据与工程技术范本。

1 地质工程概况

桂中坳陷是在加里东运动基础上形成的晚古生代海相大型沉积坳陷，基底为寒武系浅变质碎屑岩地层，坳陷及周缘地层主要为泥盆系、石炭系、二叠系和三叠系，累计厚度可达6 000～8 000 m。桂中地区构造特征整体表现为南北向挤压叠加东西向走滑改造的特点。凤山向斜形态为宽缓双断向斜，轴线近东西向，北、南、西部均以断层为界，主体区呈现对冲构造样式。向斜核部主要出露白垩系，地势平坦；翼部出露二叠系和石炭系。目的层石炭系鹿寨组预测最大埋深4 000 m，地层倾角约为8°，较为平缓。

凤页1井于2024年12月26日开钻，一开钻进至合山组，下入直径339.7 mm表层套管封隔大隆组以上易漏地层，二开钻进至罗城组，下入直径244.5 mm技术套管封隔马平组、黄龙组等缝洞发育及不稳定地层，三开利用直径215.9 mm钻头于2025年6月5日钻进至完钻井深。该井设计井深4 962 m，由于实钻罗楼组、合山组等地层较预测增厚（表1），实际完钻井深5 540 m，实钻井身结构见图1。钻井周期为161.09 d，全井平均机械钻速4.94 m/h，取心进尺220.08 m，平均收获率97.36%。根据测井解释结果：该井油气层位置在4 008～5 384 m，其中寺门组含

表1 滇黔桂盆地桂中坳陷凤页1井设计与实钻地层埋深对比

Table 1 Comparison of Designed and Actual Drilled Formation Burial Depths in Well Fengye-1, Guizhong Depression, Dian-Qian-Gui Basin

m

层号	设计			实钻			误差深度
	顶深	底深	层厚	顶深	底深	厚度	
永福群	0	237	237	0	222	222	-15
罗楼组	237	267	30	222	890	668	623
大隆组	267	317	50	890	935	45	618
合山组	317	532	215	935	1 256	321	724
茅口组	532	1 102	570	1 256	1 910	654	808
栖霞组	1 102	1 342	240	1 910	2 146	236	804
马平组	1 342	1 842	500	2 146	2 580	434	738
黄龙组	1 842	2 132	290	2 580	2 919	339	787
大浦组	2 132	2 312	180	2 919	3 356	437	1 044
罗城组	2 312	2 567	255	3 356	3 783	427	1 216
寺门组	2 567	2 667	100	3 783	4 025	242	1 358
黄金组	2 667	3 112	445	4 025	4 799	774	1 687
鹿寨组	3 112	3 752	640	4 799	5 540	741	1 788
融县组	3 752	4 862	1 110				
东港岭组	4 862	4 962	100				

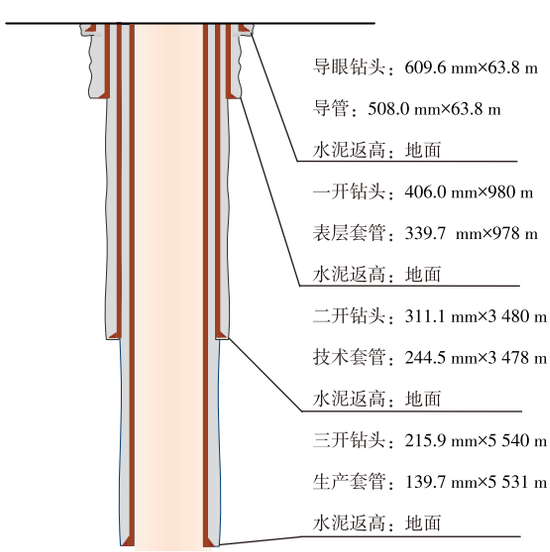


图1 滇黔桂盆地桂中坳陷凤页1井实钻井身结构

Fig. 1 As-Drilled Wellbore Structure of Well Fengye-1 in the Guizhong Depression, Dian-Qian-Gui Basin

气层3层3.8 m，黄金组含气层4层9.5 m，鹿寨组一类页岩气4层128.4 m、二类页岩气4层81.5 m，油气显示较好，于2025年7月17日完成对直径139.7 mm×12.7 mm（壁厚）TP155V TP-CQ套管的下入及固井作业，井身质量、固井质量优质，取全取准资料，优质高效完成了钻探施工任务。

2　钻井施工难点

1）井漏风险高

广西柳州地区属典型喀斯特地貌，浅层罗楼组缝洞发育，合山组上部与地下水连通，下部钻遇泥盆系、石炭系碳酸盐岩地层，中深层裂缝发育，井漏风险贯穿浅—中层[4]。邻井宜页1井在罗楼组、合山组累计漏失4 629 m^3，德胜1井同层位累计漏失22 000 m^3，漏失量大、堵漏难度高，表明该区碳酸盐岩地层承压能力整体薄弱。

2）地层可钻性差

自二叠系大隆组进入古生界后，岩性频繁交替，软硬互层特征突出。茅口组、栖霞组等地层硅质条带与石英砂岩发育，硅质含量超30%，研磨性强，导致钻头磨损严重、机械钻速低，严重制约施工进度。

3）砂泥岩互层易井壁失稳

黄金组砂泥岩互层处泥质胶结疏松，层间裂缝发育。钻进过程中，泥岩应力释放发生剥落垮塌，层间砂岩失去支撑后加剧井壁失稳，易诱发憋泵、憋顶驱甚至卡钻[5-6]。

4）古生界深层连续取心难度大

系统取心层位鹿寨组二段埋深大、压实程度高，灰黑色泥岩硬度高、可钻性差[7]。三开裸眼段长达1 500 m，需穿过易垮的黄金组地层；目的层鹿寨组可能发育高角度裂缝，进一步增加岩心割裂风险。长裸眼、多风险因素叠加，对取心工具和工艺提出极高要求。

5）长封固段固井漏失与气窜风险并存

二开马平组、黄龙组钻进中遇溶洞型及裂缝型漏失，存在多个漏点。三开黄金组4 300～4 700 m砂泥岩互层垮塌形成不规则井眼，平均井径扩大率达30%，固井顶替效率受限；寺门组、黄金组、鹿寨组含气井段长达231.6 m，气窜风险高。生产套管封固段长达5 540 m，单级注水泥作业下环空液柱压力高、循环摩阻大，当量循环密度易突破薄弱地层破裂压力极限，固井漏失风险突出[8]。

3　钻井关键技术

3.1　避开浅层暗河、溶洞的物探电法探测井位优选技术

针对喀斯特浅层溶洞、暗河引发的恶性漏失，传统“钻遇后治理”模式成本高、成功率低、工期延误严重，需转变为“钻前预防为主、钻中治理为辅”思路。通过钻前高精度物探探测精准识别浅层不良地质体，在满足勘探目标前提下优化井位，从源头避开高危漏失区域[9]，确保表层与浅层钻井顺利，为全井高效钻探奠定基础。

为优化井位，对3个预选井位平台开展钻前物探勘察，对比高密度电法、平台广域电磁法、瞬变电磁法等适用性见表2。分析表明：高密度电法针对表层50 m探测，对充水溶洞等低阻体识别分辨率较高，成本低；平台广域电磁法探测深度达1 000 m，探测精度高，可与高密度电法互补。最终采用“高密度电法+平台广域电磁法”联合探测，在各预选平台布置2 000 m×2 000 m十字交叉测线（点距10 m），实现1 000 m以浅不良地质体全方位高精度排查[4]。

表2　浅层探测方法对比分析研选（据参考文献[10-17]修改）

Table 2　Comparative Analysis and Selection of Shallow Detection Methods（modified according to references [10-17]）

探测方法	探测深度/m	探测精度	应用成本	抗干扰性	应用效果
高密度电法	50	较高	较低	较强	好
三维高密度电法	100	高	高	较差	较好
瞬变电磁法	400	低	低	差	差
音频大地电磁法	1 000	低	较高	较差	较差
平台广域电磁法	1 000	高	较高	强	好
平台张量广域电法	1 000	高	很高	较强	好

联合探测数据揭示，3个预选平台浅层地质条件差异显著，本质上是溶蚀发育程度不同。1号平台1.0 km以浅地层电阻率均匀，反映岩体完整，漏失风险低；2号平台0～0.2 km存在大规模低阻异常带，解释为充水大型溶洞，漏失风险极高，1、2号平台物探电法探测资料见图2；3号平台虽漏失风险低，但受生态保护红线限制，不满足环保要求。综合分析，选定1号平台为正式井位。实钻验证1 000 m以浅无漏失，较邻井浅层漏失治理时间缩短100%，证实联合探测技术可有效指导井位优选，规避浅层溶洞漏失风险。

3.2　失返性漏失的高注高挤堵漏技术

钻前井位优化避开了浅层大型溶洞，但二维地震解释揭示，井深2 146～2 700 m马平组存在强波阻组合特征，预测裂缝溶洞发育[18-19]。实钻至2 196.49 m、2 344.97 m遇厘米级放空，井口失返，证实为中深层裂缝-溶洞型恶性漏失。此类漏失通道尺度大、连通性强，传统桥浆堵漏材料难以在漏层有效滞留堆积，邻井同类漏层多次堵漏失败，延误周期18 d。为此，提出“先疏导

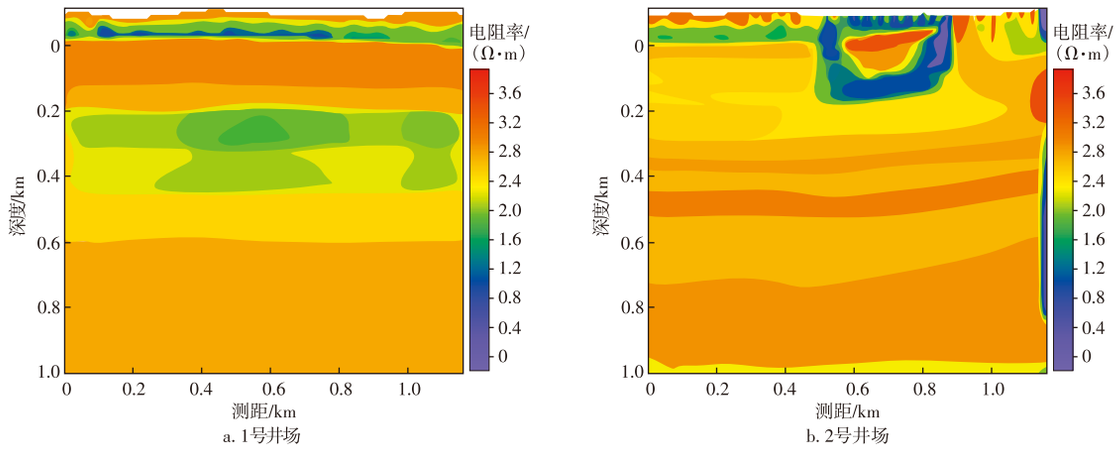


图2 1、2号井场平台广域电磁法单测线二维反演剖面

Fig. 2 WFEM 2D inversion, Site 1, 2

暴露、后充填封堵”的治理思路，形成“清水强钻+高注高挤”复合堵漏工艺。

1)清水强钻：安全暴露漏失通道

清水强钻的核心在于以清水为介质，避免钻井液固相提前堵塞通道，从而完整暴露漏层范围与形态[20]。针对马平组破碎、高研磨特性，选用直径215.9 mm牙轮钻头配合直径178.0 mm螺旋钻铤的简化钻具组合，采用“低钻压(<100 kN)、低转速(50 r/min)、中等排量(14～16 L/s)”的控时钻进参数，以均匀小钻速充分打开漏失层，根据钻时变化判断是否穿过漏层后起钻。同时制定专人监测钻具状态、观察返浆情况、控制强钻时间(≤2 h)等安全措施。该参数组合旨在平衡“充分暴露漏层”与“保障井下安全”的双重需求。

2)高注高挤：构建“颗粒架桥-纤维增强-水泥固结”复合封堵结构

清水强钻后，下入光钻杆至漏点上方，关闭防喷器，施工前通过试挤验证漏层吸收能力，再进行分段憋挤作业[21]。该工艺采用“桥浆(36%)+触变水泥浆”复合体系，封堵机理分为3个阶段：第1阶段，以直径介于2～5 mm大颗粒桥接剂优先沉降堆积，填充溶洞体积的60%～70%，纤维状材料穿插其间形成“刚性骨架”，防止骨架受地层流体冲击坍塌；第2阶段，以直径介于0.5～2.0 mm中颗粒桥接剂填充骨架空隙，36%桥浆颗粒快速形成“颗粒拱架”，初步阻断溶洞与周边裂缝的连通通道；第3阶段，触变水泥浆(G级水泥+钛螯合物触变剂)在高压下挤入骨架间隙，水化固结后形成致密水泥石，与桥浆骨架构成“柔性膨胀层+刚性密封层”复合结构，实现对大尺度裂缝溶洞的永久封堵。

挤注施工后采用憋压候凝提高水泥石与井壁的胶结强度，候凝后下入直径311.1 mm PDC钻头扫塞至漏点以上5 m，循环处理井筒后控时钻进，并通过动态承压试验验证井筒承压能力，确保堵漏效果可靠。

本井2次失返性漏失均采用该工艺一次性治理成功，无复漏，累计注水泥78 m^3。与邻井传统技术对比，漏失量降低93%，堵漏周期缩短57%，证实“清水强钻+高注高挤”工艺可有效解决中深层大型裂缝-溶洞型漏失难题。

3.3 应对高研磨性地层的钻井提速提效技术

环江—柳州地区所钻地层以古生界为主，多套地层硅质含量高，目前国内外针对该性质地层钻井平均机械钻速普遍偏低，消耗钻头数普遍较多，影响施工周期。本井在施工期间根据实钻情况开展钻头评价，结合邻井可钻性极值、地层岩性特征与实钻钻井参数响应，建立多因素协同选型机制，及时调整钻头选型，各开次均取得了良好的应用效果[22-25]。

1)二开井段(980～3 480 m，合山组—罗城组)

二开井段(980～3 480 m)以灰岩、白云岩为主，纵向上岩性与研磨性差异显著。合山组至茅口组上部为灰岩、含硅灰岩，岩性相对均一，研磨性中等；进入茅口组下部后，硅质条带增厚，非均质性增强；栖霞组、马平组、黄龙组则以白云质灰岩、白云岩为主，整体硬度高、研磨性强。基于邻井声波时差数据与区域可钻性经验公式，计算本开次地层可钻性级值介于8～11，属高研磨低可钻性地层，钻头选型需兼顾抗研磨与破岩效率。

前期选用6刀翼16 mm齿KSD1663DRT型PDC钻头，在合山组至茅口组上部井段(1 194～1 473 m)单只进尺279 m，机械钻速10.62 m/h。该段岩性以灰岩为主，在钻压160～202 kN、转速70 r/min、排量60～62 L/s的参数区间内，钻头切削效率高、磨损较慢，表明常规攻击型PDC钻头与中等研磨性地层匹配良好。但进入茅口组下部后，硅质含量上升、岩性冲击性增强，井底机械比能由100～150 MPa急剧升至600～700 MPa(图3)，表明破岩方式由剪切转变为冲击破碎，钻头肩部齿受冲击崩损严

重(图4)，该趟进尺仅48 m。这一对比揭示，井底机械比能的突变是地层研磨性增强的直接响应，可作为判断钻头与地层匹配度的敏感指标。

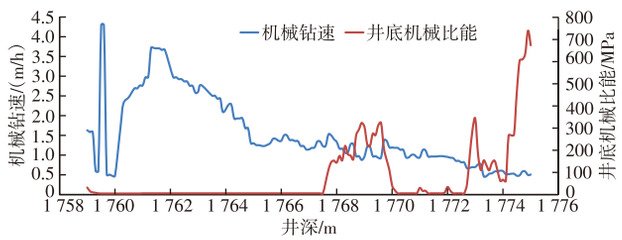


图3　二开第4趟钻井底机械比能与机械钻速变化关系

Fig. 3　Variation of Mechanical Specific Energy with ROP for Run 4 of Phase II Drilling



图4　茅口组井段1 759～1 867 m钻头磨损

Fig. 4　Bit Wear Diagram, Maokou Fm. Interval 1 759-1 867m

更换KPM1663DST型混合钻头后，依托牙轮-刀翼复合破岩优势提升抗冲击能力，单只进尺提升至233 m。但该钻头在高转速区间(60～80 r/min)机械钻速仅3.27 m/h，反映出混合钻头虽能延长寿命，却牺牲了PDC齿的剪切破岩效率，难以满足提速需求。

综合地层岩性、可钻性级值与实钻响应，本开次钻头选型应遵循“分段匹配、差异选型”原则：上部低研磨段(合山组至茅口组上部)，适合攻击性强的常规PDC钻头，推荐钻压160～202 kN、转速70 r/min；下部高研磨段(茅口组下部至黄龙组)，需选用高强度复合片、优化刀翼与齿角的抗研磨PDC钻头，推荐钻压100～180 kN、转速65 r/min，以降低冲击载荷对切削齿的损伤速率。

基于上述认识，优选进口BF716S型与国产ES1656TE型PDC钻头，二者均采用进口高强度复合片并优化了刀翼与齿角设计，现场应用单只进尺最高774 m，机械钻速最高11.11 m/h，实现了长寿命与高效率的统一。据此形成“上部KSD1663DRT、下部BF716S/ES1656TE”的差异化选型方案，二开钻头分析见表3，为同类高研磨碳酸盐岩地层钻头优选提供了依据。

2)三开井段(3 480～5 540 m，罗城组—鹿寨组)

黄金组石英砂岩可钻性级值达9～10级，研磨性极强，钻头磨损是制约进尺的首要因素。基于二开经验，选用7刀翼13 mm齿BF713型与NSK713DT型PDC钻头，通过增加刀翼数分散切削载荷、减小齿径增强抗冲击能力，单只最高进尺达442 m，有效解决了高研磨地层钻头寿命短的难题(表4)。表明“多刀翼、小齿径”钻头选型是应对强研磨性石英砂岩的有效策略。

鹿寨组4 700～5 232 m岩性软硬交错，黏滑导致扭矩波动剧烈，恒扭矩工具能够抵消地层软硬交错产生的转矩突然变大和黏滑，因此采用“直径215.9 mm PDC钻头+直径172 mm螺杆+恒扭矩工具+钻杆”组合，可将增大、易引发钻头憋钻的钻进扭矩转化为BHA(下部钻具组合)的轴向收缩，使钻头钻压迅速降低，让钻头在相对恒定的扭矩下平稳钻进，进而延长钻头使用寿命[26]，如表5所示。针对鹿寨组5 355～5 540 m以泥岩为主的研磨性相对较弱地层，选用6刀翼16 mm齿ES1656E型PDC钻头，增加钻头攻击性提高机械钻速。最终全井平均机械钻速为4.94 m/h，较邻井提升28%。

3.4　“多级粒径+微纳米封堵”垮塌治理技术

黄金组4 300～4 700 m发育大量小于1 μm微裂缝与1～10 μm溶蚀孔，如图5所示；岩性为破碎砂泥岩互层，胶结疏松如图6所示。分析失稳机理为“力学失衡+水化作用”：揭开地层后，钻井液密度不足以平衡地层坍塌压力，地层发生应力释放并引发井壁失稳[27]；加之钻井液滤液侵入地层，造成泥岩膨胀、砂岩垮塌，井径扩大率达30%。采用“密度平衡+强封堵”治理思路，解决井壁失稳问题。

1)钻井液体系优化

针对本井黄金组硬脆性砂泥岩易垮塌、寺门组至鹿寨组含气井段长的双重挑战，钻井液需同时满足“强抑制防塌”与“致密封堵防气窜”两项核心要求。因此，抗高温钾胺基聚合物纳米防塌钻井液体系的优化思路为：以两性离子聚合物(0.3%～0.5%)+氯化钾(7%～10%)+聚胺抑制剂(0.3%～0.5%)构成复合抑制体系，通过钾离子镶嵌与聚合物包被双重作用抑制泥岩水化分散，从源头减缓井壁失稳；以微纳米封堵剂(1.5%～2.0%)+超细碳酸钙(3%)+阳离子沥青胶乳(1.5%～2.0%)构建多级封堵体系，实现对微裂缝的有效充填；辅以磺化酚醛树脂(1.5%～2.0%)提供抗高温降滤失能力。该体系在120 ℃、16 MPa条件下高温高压滤失量不大于15 mL，动切力不小于25 Pa，具备强抑制、强封堵、抗高温的综合性能。

2)强化封堵与密度优化

井壁稳定控制的核心在于平衡“力学支撑”与“化学

表3 滇黔桂盆地桂中坳陷凤页1井二开各趟次钻头分析

Table 3 Analysis of Drill Bits for Each Run in the Second Spud of Well Fengye-1 in the Central Guangxi Depression, Dian-Qian-Gui Basin

趟次	钻头型号	所钻地层	地层岩性	钻井参数			井段/m	进尺/m	机械钻速/(m/h)	起钻原因分析	钻头磨损情况
				钻压/kN	转速/(r/min)	排量/(L/s)					
1	KSD1663DFRT	合山组	浅灰色灰岩、硅质灰岩、生屑灰岩	41～209	70	55～60	980～1 194	214	4.67	钻时30 min/m，机械比能500 MPa，吃入深度0.2 mm	肩部切削齿崩齿
2	KSD1663DRT	合山组、茅口组		160～202	70	60～62	1 194～1 473	279	10.62	钻时35 min/m，机械比能400 MPa，吃入深度0.2 mm	肩部齿崩齿、磨损
3	KPM1663DST	茅口组		160～214	80	58～60	1 473～1 759	286	5.56	扭矩非正常14 kN·m，且钻时呈上升趋势	PDC掏心、牙轮松动
4	KSD1662DFRTY	茅口组	含硅灰岩、浅灰色灰岩、白云质灰岩、深灰色含硅灰岩、硅质灰岩、泥质灰岩、灰黑色碳质灰岩	154～207	72	60～61	1 759～1 775	16	4.87	钻时35 min/m，机械比能700 MPa，吃入深度0.2 mm	肩部斧型齿碎裂
5	KSD1663DFRT	茅口组		160～232	70	55～60	1 775～1 823	48	4.24	钻时30 min/m，机械比能350 MPa，吃入深度0.2 mm	肩部齿崩齿、磨损严重
6	KSD1663DRT	茅口组		160～197	60	55～60	1 823～1 867	44	3.21	钻时30 min/m，机械比能600 MPa，吃入深度0.2 mm	肩部齿磨损严重
7	KPM1663DST	栖霞组	灰色灰岩、生屑灰岩，深灰色灰岩、含云灰岩、含泥灰岩	150～171	60	55～60	1 867～2 100	233	3.27	扭矩非正常12 kN·m，且钻时呈上升趋势	肩部齿磨损、轻微掏心
8	BF716S#1	栖霞组、马平组		130～161	65	55～60	2 100～2 196	96	11.11	钻进至2 196 m井口失返，发生井漏起钻	无磨损
9	BF716S#1	马平组	浅灰色灰岩、生屑灰岩、含云灰岩、白云质灰岩、含硅灰岩、灰质白云岩、白云岩	130～150	65	50～55	2 212～2 345	133	5.36	钻进至2 345 m发生漏失，起钻更换钻具组合	轻微磨损
10	ES1656TE	马平组、黄龙组	棕红色白云质灰岩，灰白色白云岩，浅灰色灰质白云岩、白云岩、白云质灰岩、含云灰岩、泥质白云岩	120～180	65	50～52	2 345～2 706	361	5.41	钻进至井深2 705.69 m发生井漏，起钻	肩部切削齿磨损严重、碎齿
11	ES1656TE	黄龙组、大浦组、罗城组	浅灰色白云岩、灰色白云岩、深灰色白云岩、浅棕色白云岩、灰色泥质白云岩	100～180	65	50～52	2 706～3 480	774	7.31	二开完钻	肩部切削齿磨损严重均为碎齿

表4 滇黔桂盆地桂中坳陷凤页1井黄金组发育石英砂岩地层钻头使用情况

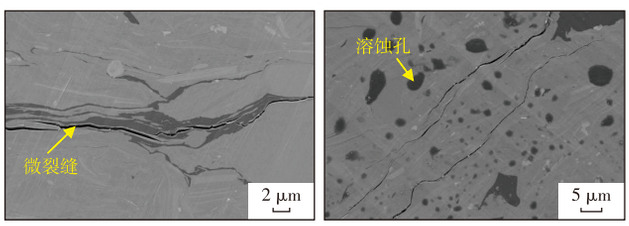
Table 4 Drill Bit Usage in the Quartz Sandstone Formations Developed in the Huangjin Formation of Well Fengye-1, Central Guangxi Depression, Dian-Qian-Gui Basin

钻头型号	井段/m	进尺/m	石英砂岩厚度/m	机械钻速/(m/h)	钻头磨损情况
BF713	4 026～4 468	442	114	4.69	钻头外径磨损，保径齿有碎齿
NSK713DT	4 468～4 577	442	21	3.02	钻头鼻部齿平磨而且有轻微碎齿现象，外锥齿到肩部齿有碎齿
NSK713DT	4 583～4 700	117	30	2,37	外径磨损，钻头内锥齿2个发生碎齿现象，鼻部齿平磨和碎齿现象，外锥齿到肩部齿碎齿现象严重，水眼破碎2个

表5　恒扭矩工具应用效果对比

Table 5　Constant Torque Tool Application Comparison

钻头型号	地层岩性	钻压/kN	转速/(r/min)	排量/(L/s)	井段/m	进尺/m	钻头入井新度/%	钻头出井新度/%	备注
BF713	砂砾岩、泥岩、灰岩	100～140	60	43	4 700～4 926	226	100	95	使用恒扭矩工具
ES1357E	砂砾岩、泥岩、灰岩	100～140	60	42	4 980～5 108	128	100	95	使用恒扭矩工具
ES1357E	砂砾岩、泥岩、灰岩	100～140	60	43	5 144～5 232	128	100	95	未使用恒扭矩工具



a. 微裂缝　　b. 溶蚀孔

图5　黄金组井深4 580 m微裂缝及溶蚀孔分布

Fig. 5　Microfracture & Dissolved Pore Distribution at 4 580 m, Huangjin Fm



a. 岩性破碎　　b. 裂缝发育

图6　黄金组井深4 578～4 579 m岩心状态

Fig. 6　Core Condition Diagram, Huangjin Fm., 4 578～4 579 m

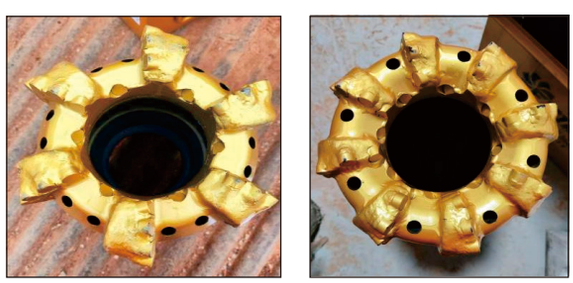
封堵”的关系。参考邻井漏失压力当量密度低于1.70 g/cm³，将钻井液密度逐步提至1.67 g/cm³，以提供足够液柱压力支撑井壁、抑制坍塌压力。在密度提升受限的情况下，进一步强化封堵能力是控制井壁失稳的关键：采用多级粒径匹配封堵策略，以复合型防塌剂（粒径5～15 μm，加量2%～3%）封堵孔径大于5 μm的溶蚀孔，以超细碳酸钙（粒径1～5 μm，加量3%～5%）封堵1～5 μm孔隙，将微纳米封堵剂加量3%封堵微裂缝，形成由粗到细的致密封堵层[28-29]，高温高压滤失量降至10 mL以内。配合专项通井、稠浆扫井等井筒净化措施，有效控制了硬脆性砂泥岩地层的井壁失稳。

3.5　破碎地层取心技术

凤页1井鹿寨组二段取心层位为灰黑色泥岩与泥质灰岩互层，垂深达5 355 m，面临地层可钻性差、裸眼段长、地层破碎及高角度裂缝发育等难点。通过优选取心工具与优化钻进工艺，高效完成取心作业，获取关键地质资料。

1）优选取心工具

取心钻头采用差异化选型，常规地层选用6刀翼13 mm齿ESC1306G型，破碎及高角度裂缝发育地层选用8 mm齿8刀翼ESC808G型，如7所示，其耐磨复合片可适配强研磨性地层，偏向井壁的斜水眼设计能避免钻井液射流直接冲刷岩心，提升清岩效果与钻头稳定性，降低岩心破碎率[30]；取心筒优选苏Ⅲ型，其外筒稳定性强，内筒底部通用底轴承可提升居中度、减少晃动，铝合金内筒内壁光滑，能降低岩心入筒阻力与堵心发生率。



a. 型号ESC1306G　　b. 型号ESC808G

图7　型号ESC1306G、ESC808G取心钻头特征

Fig. 7　Features of ESC1306G and ESC808G Coring Bits

2）优化取心工艺

①参数适配：树心钻压控制在30～50 kN，进尺不小于0.5 m；树心后钻压提至120 kN，转速介于40～50 r/min，排量不大于25 L/s，结合扭矩动态调整。②堵心分析判断：通过扭矩（异常抬升或抬升后均值下降）、钻时（异常增加）、钻压（只升不降）联合研判，辅以原悬重+摩阻法验证[4]。最终本井完成22回次取心，累计进尺220.08 m，综合收获率97.36%；其中鹿寨组主力层18回次取心进尺205.50 m，收获率98.14%，形成了可复制的深层破碎地层取心技术体系。

3.6　长井段固井技术

针对长封固段、多漏点、“糖葫芦”井眼及高气窜风险，通过优化固井工艺、水泥浆体系及扶正器组合，保障固井质量。

1）二开固井防漏技术

二开裸眼段发育多个漏失点，采用“正注反挤”工艺解决水泥浆一次性返高困难的问题[31]。正注阶段，领浆采用1.50 g/cm³漂珠低密度弹韧性防气窜水泥浆，通过空心玻璃微珠（20%）降低密度、SiO_2（14%）提升高温强度、丁苯胶乳（4%）增强防气窜能力；尾浆采用密度1.88 g/cm³弹

韧性防气窜水泥浆，确保下部封固质量。72 ℃稠化实验显示：领浆稠化时间为351 min，48 h抗压强度为9.5 MPa；尾浆稠化时间为259 min、24 h抗压强度为15.6 MPa，满足长封固段施工安全窗口要求。

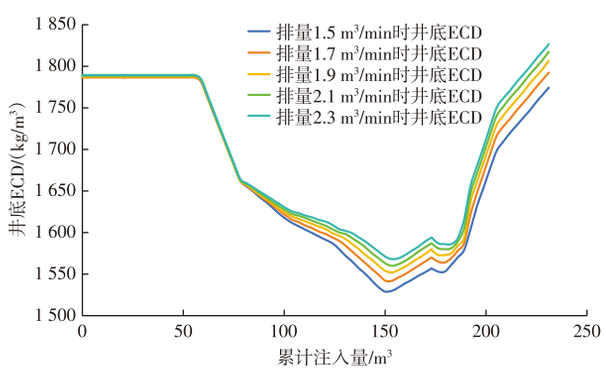
施工参数控制遵循“平衡压力、逐级降排”原则：注水泥阶段领浆、尾浆排量均为2.0 m^3/min，密度偏差控制在±0.03 g/cm^3以内，保证浆柱压力均匀；替浆阶段采用阶梯降排量由大到小依次为2.8、1.8、0.8 m^3/min，碰压压力为19 MPa，避免激动压力压漏薄弱地层。

反挤施工在正注候凝24 h后实施，施工压力上限取表层套管抗内压强度（18.8 MPa）与技术套管抗外挤强度（30.5 MPa）二者80%限值中的较小值，据此反算排量上限为2.4 m^3/min，确保作业安全受控。注入纤维增强水泥浆60 m^3后关井候凝48 h，纤维的增韧作用有效防止水泥石收缩开裂。采用上述措施后，技术套管固井质量良好。

2）三开固井防漏与提效技术

三开固井难点在于“糖葫芦”井眼导致顶替效率低，且含气井段长，气窜风险突出。领浆采用1.50 g/cm^3漂珠低密度水泥浆，引入橡胶颗粒（5%）增强韧性、木质素磺酸盐（2%）改善流变性；尾浆采用密度1.88 g/cm^3弹韧性防气窜体系，110 ℃稠化实验测得领浆、尾浆稠化时间分别为282 min和198 min，48 h后抗压强度分别达18.2 MPa和20.5 MPa，高温下仍保持良好施工性能与力学强度。

顶替效率是保障不规则井眼固井质量的关键。通过固井模拟优化（图8），当注水泥排量为2.1 m^3/min，累计注入量达到231 m^3，即固井模拟完成时，全过程最大井底ECD（循环当量密度）为1 817 kg/m^3，；排量大于2.1 m^3/min时，最大井底ECD将超过实钻验证的漏失临界值1 825 kg/m^3。据此优选注水泥排量为2.1 m^3/min，既能确保顶替效率又能有效避免压漏地层。提高套管居中度是改善窄边顶替的核心手段：目的层每2根套管安放1只扶正器，大肚子井段树脂旋流扶正器与弹性扶正器交替安放，重叠段、裸眼段居中度分别达87%和89%。配合“大排量紊流+小排量塞流”复合顶替工艺[32-33]，有效清除不规则井眼中的滞留钻井液。采取以上措施后，生产套管固井质量优质，验证了“优化浆柱设计+精细控压顶替+提高居中度”技术组合对长封固段复杂井眼的适应性。



注：ECD为循环当量密度，单位kg/m^3。

图8　不同排量下固井井底ECD模拟结果

Fig. 8　Simulation Results of Bottomhole ECD at Various Pump Rates

4　结论与展望

1）针对喀斯特区浅层溶洞漏失与中深层失返性漏失难题，形成“钻前电磁联合探测井位优化+钻中清水强钻+高注高挤复合堵漏”技术体系，可从源头规避及高效治理漏失风险。未来研究可进一步深入探讨马平组漏失机理，以期为持续提升井漏处理的效率与经济性提供更坚实的理论支撑。

2）构建的差异化提速技术方案适配性显著，其中7刀翼13 mm齿进口复合片钻头适配强研磨性地层、6刀翼16 mm齿钻头适配低硅质灰岩，配合恒扭矩工具实现了全井提速目标。未来可进一步融合区域测井数据，构建凤山地区更为精确的可钻性剖面，从而为钻头选型与参数优化提供更全面的科学依据，持续提升机械钻速。

3）“多级粒径防塌剂+微纳米封堵剂”协同封堵技术，能有效封堵黄金组微裂缝与溶蚀孔，解决砂泥岩互层段井壁失稳问题。在未来的研究中，可进一步结合多元实测数据，探索地层坍塌压力预测的新方法，进而优化钻井液密度与配方，不断强化井壁稳定控制能力，降低复杂事故发生率。

4）“ESC1306G/ESC808G钻头+苏Ⅲ取心筒”组合搭配科学取心参数与堵心判断方法，实现了深层破碎地层高进尺、高收获率取心；弹韧性防窜水泥浆体系结合固井参数优化与扶正器合理布置，保障了长封固段固井质量优质稳定。

参 考 文 献

[1]　周雁, 朱东亚, 孟庆强, 等. 桂中盆地页岩气地质条件及潜力分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(5): 529-537.
Zhou Yan, Zhu Dongya, Meng Qingqiang, et al. Geological conditions and exploration potential of shale gas in Central Guangxi basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(5): 529-537.

[2]　毛佩筱, 王星星, 吴凯凯, 等. 桂中坳陷西北部下石炭统岩关组泥页岩储层特征研究: 以环页1井为例[J]. 地质科技情报, 2018(3): 169-176.
Mao Peixiao, Wang Xingxing, Wu Kaikai, et al. Characteristics of shale gas reservoir in the lower Carboniferous yanguan formation, northwestern Guizhong depression: a case study of well huanye 1[J]. Geological Science and Technology Information, 2018(3): 169-176.

[3]　卢树藩, 何犇, 杜胜江. 黔南代页1井下石炭统打屋坝组页岩气地

质条件及勘探前景[J]. 中国地质调查, 2016, 3(4): 6-11.
Lu Shufan, He Ben, Du Shengjiang. Geological conditions and exploration prospect of shale gas in Dawuba Formation of Lower Carboniferous of Daiye-1 well in southern Guizhou Province[J]. Geological Survey of China, 2016, 3(4): 6-11.

[4] 陈小元. 地质调查井桂融页1井钻井关键技术[J]. 复杂油气藏, 2022, 15(1): 108-112.
Chen Xiaoyuan. Key drilling technology of geological survey well Guirongye 1[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2022, 15(1): 108-112.

[5] 蒲美玲. 油气井井壁失稳预防与处理新技术[J]. 江汉石油职工大学学报, 2012, 25(6): 18-22.
Pu Meiling. On new technique for preventing and handling the instability of wall of oil-gas wells[J]. Journal of Jianghan Petroleum University of Staff and Workers, 2012, 25(6): 18-22.

[6] 白杨, 杨震, 白浩成, 等. 红星地区吴家坪组地层井壁失稳机理研究及钻井液对策[J]. 断块油气田, 2025, 32(4): 685-691.
Bai Yang, Yang Zhen, Bai Haocheng, et al. Study on borehole instability mechanism and drilling fluid countermeasures of Wujiaping Formation in Hongxing area[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2025, 32(4): 685-691.

[7] 张丽, 白永辉, 王长城, 等. 古近系地层取心钻进速度影响因素初步分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(12): 24-28.
Zhang Li, Bai Yonghui, Wang Changcheng, et al. Preliminary analysis of the influencing factors of core drilling rates in the Paleogene strata[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(12): 24-28.

[8] 李旭, 任胜利, 刘文成, 等. 单一环空窄间隙条件下固井液当量循环密度及其数值模拟计算[J]. 钻采工艺, 2021, 44(4): 23-27.
Li Xu, Ren Shengli, Liu Wencheng, et al. Equivalent circulating density calculation of cementing fluid and its numerical simulation for narrow annuli with single radial size[J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(4): 23-27.

[9] 郑健, 井翠, 周昊, 等. 非震地球物理方法在川南页岩气钻井防漏中的应用[C]. 成都: 中国石油学会天然气专业委员会, 2017.
Zheng Jian, Jing Cui, Zhou Hao, et al. Application of non-seismic geophysical methods to lost circulation prevention in shale gas drilling in southern Sichuan [C]. Chengdu: Natural Gas Professional Committee, Chinese Petroleum Society, 2017.

[10] 杨进, 刘树才, 姜志海. 高密度电阻率法在工程地质勘查中的应用[J]. 工程勘察, 2007, 35 (4): 67-70.
Yang Jin, Liu Shucai, Jiang Zhihai. Application of high-density resistivity method in engineering geological investigation[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2007, 35(4): 67-70.

[11] 牛之琏. 时间域电磁法勘探[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 2000.
Niu Zhilian. Time-domain electromagnetic exploration[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 2000.

[12] 唐祥功, 芮拥军, 王延光, 等. 全节点地震"全时间、全空间"处理技术及应用[J]. 石油物探, 2026, 65(4): 648-663.
Tang Xianggong, Rui Yongjun, Wang Yanguang, et al. All-time full-space processing technology and its application to full-node seismic data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2026, 65(4): 648-663.

[13] 汤井田, 任政勇, 周聪, 等. 浅部频率域电磁勘探方法综述[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2681-2705.
Tang Jingtian, Ren Zhengyong, Zhou Cong, et al. Frequency-domain electromagnetic methods for exploration of the shallow subsurface: a review[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2681-2705.

[14] 张阳阳, 杜威, 王芝水, 等. 音频大地电磁法二阶叠层有限元正演研究[J]. 石油物探, 2025, 64(3): 587-594
Zhang Yangyang, DU Wei, WANG Zhishui, et al. Second-order hierarchical basis function-based finite element method for audiomagnetotelluric forward modeling[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2025, 64(3): 587-594.

[15] 何继善. 广域电磁法和伪随机信号电法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
He Jishan. Wide-area electromagnetic method and pseudo-random signal electrical method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.

[16] 宋汐瑾, 白楠. 井下页岩层压裂裂缝的数值模拟与瞬变电磁响应特征分析[J]. 石油物探, 2025, 64(4): 772-783.
Song Xijin, Bai Nan. Numerical simulation and transient electromagnetic response characteristics of fracturing-induced fractures in underground shale formations[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2025, 64(4): 772-783.

[17] 何继善, 张大伟, 蒋奇云, 等. 广域电磁法技术进展与多领域应用综述[J]. 中国有色金属学报, 2026, 36(2): 409-429.
He Jishan, Zhang Dawei, Jiang Qiyun, et al. Comprehensive review on technological advancements and multidisciplinary applications of wide-field electromagnetic methods[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2026, 36(2): 409-429.

[18] 赵福祥, 罗宁, 赵德喜, 等. 任深2井溶洞性漏失堵漏工艺探索与实践[J]. 钻井液与完井液, 2007, 24(3): 27-28.
Zhao Fuxiang, Luo Ning, Zhao Dexi, et al. Technology for prevention of mud losses into solution caves in well Renshen-2[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2007, 24(3): 27-28.

[19] 李乾, 王睿, 杨斌, 等. 深井超深井油基钻井液堵漏材料的研究及应用 [J]. 石油与天然气化工, 2025, 54(5): 58-64.
Li Qian, Wang Rui, Yang Bin, et al. Research and application of plugging materials for oil-based drilling fluid in deep and ultra-deep wells[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2025, 54(5): 58-64.

[20] 肖建波, 晏凌. 井底清水强钻处理恶性井漏的方法[J]. 钻采工艺, 2000, 23(4): 96-97.
Xiao Jianbo, Yan Ling. Treatment of malignant lost circulation by drilling with clear water at the bottom of the well[J]. Drilling & Production Technology, 2000, 23(4): 96-97.

[21] 张何东, 陈敏华, 张华, 等. 失返性漏失地层高注高挤注水泥堵漏技术[J]. 天然气勘探与开发, 2025, 48(4): 80-89.
Zhang Hedong, Chen Minhua, Zhang Hua, et al. High-injection and high-squeeze cementing plug technology for lost-return formations [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2025, 48(4): 80-89.

[22] 张辉, 高德利. 钻头下部未钻开地层的可钻性预测新方法[J]. 石油学报, 2006, 27(1): 97-100.
Zhang Hui, Gao Deli. A new method for predicting drillability of un-drilled formation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(1): 97-100.

[23] 刘伟吉, 张家辉, 冯嘉豪, 等. 基于全井机械比能模型的钻井参数优化[J]. 断块油气田, 2025, 32(6): 1051-1056.
Liu Weiji, Zhang Jiahui, Feng Jiahao, et al. Optimization of drilling

parameters based on whole well mechanical specific energy model[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2025, 32(6): 1051-1056.

[24] 邹德永, 程远方, 查永进, 等. 利用岩屑波速随钻检测地层可钻性及优选钻头类型[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2005, 29(1): 37-40.
Zou Deyong, Cheng Yuanfang, Zha Yongjin, et al. Rock-drillability evaluation and bit selection through ultrasonic velocity measurement on cuttings[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005, 29(1): 37-40.

[25] 王治国, 严焱诚, 黄河淳, 等. 井研—犍为地区难钻地层钻头优选及应用[J]. 科技和产业, 2024, 24(16): 194-198.
Wang Zhiguo, Yan Yancheng, Huang Hechun, et al. Optimization and application of drill bits for difficult drilling formation in the Jingyan-Qianwei area[J]. Science Technology and Industry, 2024, 24(16): 194-198.

[26] 田家林, 唐磊, 刘强, 等. 恒扭提速钻具动力学特性研究与试验分析[J]. 中国海上油气, 2022, 34(4): 203-212.
Tian Jialin, Tang Lei, Liu Qiang, et al. Dynamics characteristics study and experiment of constant torque speed-up drilling tool[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(4): 203-212.

[27] 歹震东, 朱宽亮, 李皋, 等. 南堡油田硬脆性泥页岩地层井壁失稳原因实验[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(3): 1018-1023.
Dai Zhendong, Zhu Kuanliang, Li Gao, et al. Experiment of wellbore instability in hard brittle shale formation in nanpu oilfield[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(3): 1018-1023.

[28] 陈二丁, 赵红香, 张海青, 等. 胜利博南洼陷页岩油合成基钻井液技术[C]. 西安: 陕西省石油学会, 2021.
Chen Erding, Zhao Hongxiang, Zhang Haiqing, et al. Synthetic-based drilling fluid technology for shale oil in the Bonan Sag, Shengli [C]. Xi'an: Shaanxi Petroleum Society, 2021.

[29] 黄维安, 张砚清, 李科, 等. 油基钻井液井壁强化技术研究进展[J]. 石油与天然气化工, 2025, 54(4): 82-89.
Huang Wei'an, Zhang Yanqing, Li Ke, et al. Research progress on wellbore strengthening technology of oil-based drilling fluid[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2025, 54(4): 82-89.

[30] 成景民, 冯会斌, 王治中, 等. 深井灰岩破碎地层取心技术及应用[J]. 钻采工艺, 2006, 29(3): 26-27.
Cheng Jingmin, Feng Huibin, Wang Zhizhong, et al. Deep broken formation coring technology and its application[J]. Drilling & Production Technology, 2006, 29(3): 26-27.

[31] 蒋毅, 曾知昊, 程兴洁. 溢漏同存井尾管正注反挤固井技术在GS138井的应用[J]. 石油工业技术监督, 2021, 37(10): 34-38.
Jiang Yi, Zeng Zhihao, Cheng Xingjie. Application of liner "forward injection-reverse extrusion" Cementing technology in well GS 138 with overflow and lost circulation[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2021, 37(10): 34-38.

[32] 方春飞, 周仕明, 李根生, 等. 井径不规则性对固井顶替效率影响规律研究[J]. 石油机械, 2016, 44(10): 1-5.
Fang Chunfei, Zhou Shiming, Li Gensheng, et al. Study on influence law of borehole rugosity on cementing displacement efficiency[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(10): 1-5.

[33] 杨谋, 宋泽平, 赵鹏超, 等. 尾管注水泥管内混窜对顶替效率影响分析[J]. 断块油气田, 2025, 32(4): 698-704.
Yang Mou, Song Zeping, Zhao Pengchao, et al. Analysis of impact of in-pipe intermixing of liner cementing on displacement efficiency[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2025, 32(4): 698-704.

（编辑 李青）